不同起源秋茄林湿地重金属污染与健康风险评价

潘 辉[1,2]，郑开基[3]，游巍斌[1,2]，王韧[4]，蔡金标[5]，何东进[1,2*]

（1. 福建农林大学林学院，福州 350002；2. 福建省南方森林资源与环境工程技术中心，福州 350002；3. 福建省林业调查规划院，福州 350003；4.福鼎市林业局，福鼎 355200；5. 霞浦县林业局，霞浦 355100）

摘要：秋茄（*Kandelia obovata*）林生态系统的重金属污染是滨海湿地研究的重要组成。为探究闽东不同起源秋茄林湿地的健康风险与重金属污染的状况，运用污染负荷指数法和人体健康风险评价法分析闽东不同起源秋茄林湿地表层沉积物重金属的含量特征并评估其健康风险。结果表明：（1）秋茄天然林湿地表层沉积物重金属平均含量排序为 Zn（102.38 mg·kg^{-1}）> Pb（101.53 mg·kg^{-1}）> Cu（11.72 mg·kg^{-1}）> Cd（0.91 mg·kg^{-1}）；秋茄人工林表层沉积物重金属含量排序为 Zn（152.81 mg·kg^{-1}）> Pb（105.83 mg·kg^{-1}）> Cu（16.38 mg·kg^{-1}）> Cd（1.33 mg·kg^{-1}）。（2）天然红树林表层沉积物重金属的区域污染负荷指数（$I_{PL\ zone}$）低于人工红树林，对应的污染等级均为 1，属于中度污染。（3）秋茄林湿地表层沉积物重金属对成年男性和成年女性非致癌风险（Non carcinogenic Risk, *RN*）均低于 1，对人体造成的非致癌风险很低，Pb 元素对儿童的 *RN* 高于 1，会对儿童造成非致癌风险；Cd 对成年男性、成年女性和儿童的致癌风险（Cancer Risk, *RI*）均大于 1.0×10^{-6}，对人体存在严重的致癌风险。综上所述，闽东秋茄林湿地重金属污染较为严重，应控制湿地周边污染物排放和对湿地进行净化治理。

关键词：重金属污染，秋茄林，沉积物，健康评价，闽东湿地

中图分类号：X502　　　　**文献标识码：**A　　　　**文章编号：**

Heavy metal pollution and health assessment of different provenances of *Kandelia obovata* sediment

PAN Hui[1,2], ZHENG Kaiji[3], YOU Weibin[1,2], WANG Ren[4], CAI Jinbiao[5], HE Dongjin[1,2*]

(1. *College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University*, Fuzhou 350002, China; 2. *Fujian southern forest resources and Environmental Engineering Technology Center*, Fuzhou 350002, China; 3. *Fujian Forestry Investigation and Planning Institute*, Fuzhou 350003, China; 4. *Forestry Bureau of Fuding City*, Fuding 355200, Fujian,China ; 5. *Forestry Bureau of Xiapu City*, Xiapu 355100, Fujian, China)

Abstract: Heavy metal pollution in *Kandelia obovata* ecosystem is an important part of coastal wetland research. In order to explore the health risk and heavy metal pollution of *Kandelia obovata* wetland of different origins in eastern Fujian，this study explored the content characteristics of heavy metals in surface sediments of different origins of *Kandelia obovata* wetlands and assessed their health risks in eastern Fujian by using the pollution load index method and human health risk assessment method. The results

---

收稿日期：2021-09-13

基金项目：海岸带森林生态过程创新团队项目（71201800705）；福建省科技厅引导性项目（2015N0018）；福建省科技厅重点项目（2009N0009）；福建农林大学科技创新项目（KFA17280A）[Supported by Coastal forest ecological process innovation team project(71201800705), Guiding project of Fujian science and Technology Department(2015N0018), Key projects of Fujian science and Technology Department(2009N0009), Science and technology innovation project of Fujian agriculture and Forestry University (KFA17280A)]。

作者简介：潘辉（1997-），硕士研究生，主要从事地理学研究，（E-mail）ph1004937230@163.com。

***通信作者：**何东进，博士，教授，主要从事海岸带森林与环境研究，（E-mail）fjhdj1009@126.com。

were as follows: (1) The average content of heavy metals in surface sediments of *Kandelia obovata* natural forest wetland was Zn（102.38 mg·kg^{-1}）> Pb（101.53 mg·kg^{-1}）> Cu（11.72 mg·kg^{-1}）> Cd（0.91 mg·kg^{-1}). The order of heavy metal content in surface sediments of *Kandelia obovata* plantation was Zn（152.81 mg·kg^{-1}）> Pb（105.83 mg·kg^{-1}）> Cu（16.38 mg·kg^{-1}）> Cd（1.33 mg·kg^{-1}）. (2) The regional pollution load index ($I_{PL\ zone}$) of heavy metals in surface sediments of *Kandelia obovata* natural forest was lower than that of *Kandelia obovata* plantation, and the corresponding pollution levels of *Kandelia obovata* plantation and natural forest were both 1, which belonged to moderate pollution. (3) The non-carcinogenic risk (Non carcinogenic Risk, *RN*) of heavy metals in surface sediments of *Kandelia obovata* wetland to adult males and adult females was lower than 1, and the non-carcinogenic risk to human body was very low. The *RN* of Pb element to children was higher than 1, it would cause non-carcinogenic risk to children. The carcinogenic risk (Cancer Risk, *RI*) of Cd to adult males, adult females and children was greater than 1.0×10^{-6}, and there was a serious carcinogenic risk to the human body. The results indicate that heavy metal pollution of wetlands in eastern Fujian was serious. Therefore, we should control the pollutant emission around the wetland and purify the wetlands. In addition, adding the health risk assessment of heavy metals to the evaluation of *Kandelia obovata* wetland ecosystem will help to strengthen the ecological protection and risk management of *Kandelia obovata*.

Key words：heavy metal pollution, *Kandelia obovata* mangrove, sediment, health assessment, wetland in East Fujian Province

红树林生长在陆地与海洋交界带的滩涂浅滩，是介于陆地与海洋之间特殊的过渡带生态系统，一般分布在热带与亚热带地区的潮间带河口湿地，亦是构筑海岸防护林体系的首选（陶玉华等，2020）。近年来，红树林受围海造地、养殖、砍伐、工业污染物排放等人为干扰，导致该区域红树林生态系统面临严峻的生态环境难题（Defew et al., 2005），尤其是湿地所固有的特性更是让其作为重金属污染物的重要源和汇（Agoramoorthy et al.，2008）。重金属富集于红树林底泥不能被生物降解，具有生物毒性，存留时间久，对红树林生态系统和人类健康具有潜在危害，（何东进等，2012；Shi et al., 2019）。

重金属会对微生物群落和功能基因产生强烈影响，产生氧化应激，改变微生物群落结构，进而影响红树林功能(Fernandez-Cadena et al., 2020)。Shi et al.(2020)对我国深圳城市红树林的汞分布和风险进行研究发现，沉积物性质对汞积累的影响有限；Rezaei et al.(2021)对伊朗波斯湾北部海岸红树林组织及相关沉积物和海水中的重金属进行生态和健康风险评估发现，研究区域的红树林对锌（Zinc, Zn）和铜（Cuprum, Cu）具有合适的植物修复潜力；刘金苓等（2017）对珠海淇澳岛红树林湿地经济鱼类的重金属污染现状与对人体健康风险进行研究发现，重金属在不同食性鱼类中的分布存在差异，滩涂鱼铬（Chromium, Cr）和铅（Lead, Pb）超标，存在 Cr 中毒的健康风险；张起源等（2020）等对广东红树林沉积物有毒金属分布及生态风险评价发现，红树林沉积物中总磷（Total Phosphorus, TP）、总有机碳（Total Organic Carbon, TOC）含量越高，pH 值越低，沉积物中有毒金属含量越高。根据化学物质致癌性将金属元素分成致癌金属与非致癌金属两类，致癌金属被美国环境署（US EPA）列入高危险毒性物质清单；非致癌金属积累过多不利于人体健康，也具有潜在健康风险（Morshdy et al., 2019）。然而，目前对不同起源红树林生态系统的健康风险的了解比较有限。因此，研究重金属在红树林湿地沉积物生态系统中的累积规律及其对人体健康风险具有重要意义。

本研究以福建闽东为研究区域，选择当地人工秋茄林和天然秋茄林样地，以样地所采取的土样为试材，采用污染负荷指数、健康风险模型等方法，拟探讨以下问题：（1）闽东不同起源秋茄林湿地表层沉积物的重金属污染特征。（2）对闽东不同起源秋茄林湿地重金属健康风险进行评估。以期为闽东秋茄林的保育、健康风险管控与重金属污染的综合治理提供科学依据。

1 研究区自然概况

闽东是宁德市的俗称。人工林样地位于宁德市点头镇（120°18′ E，27°23′ N），该区域气候属亚热带海洋性季风气候，年平均气温 18.2 ℃，年平均降水量 1 500 mm，年日照数 1 727.3 h，群落类型为人工秋茄林，土壤类型为泥质土，平均地径为 11.20 m，平均冠幅为 1.1×1.1 m，平均树高为 1.80 m，郁闭度一般在 95%左右；天然林样地位于宁德市前岐镇（120°32′ E，27°30′ N），该区域气候属亚热带海洋性季风气候，年平均气温 18.5 ℃，年平均降水量 1 511 mm，年日照数 1 840 h，土壤类型为泥质土，平均地径为 26.81 m，平均冠幅为 1.42 m×1.51 m，平均树高为 1.71 m，郁闭度一般在 75%左右（何东进等，2013）。

2　研究方法

2.1　样品采集

落潮时，在福鼎市前岐镇的秋茄天然红树林湿地和点头镇的秋茄人工红树林湿地进行样品采集（均为中潮滩秋茄红树林）。在两个不同起源秋茄红树林中，根据实际情况，在垂直林缘沿入海方向设置林内 50 m（FW1）、林内 15 m（FW2）、林缘（FE）、林外 15 m（FB1）、林外 30 m（FB2）、林外 60 m（FB3）、林外 100 m（FB4）等 7 个采样点，收集表层（0-30 cm）沉积物样品，沉积物样品均在以样点为中心 5 m × 5 m 的范围内取 3 个重复。

2.2 沉积物重金属含量的测定

将取得的沉积物样品冷冻干燥至恒重后，准确称取 0.25 g 过 100 目筛的样品，选择 HNO_3-HF-$HClO_4$ 消煮法进行消煮，然后利用原子吸收分光光度计分别测定 Zn、Pb、Cu、Cd 4 种重金属的含量，每份样品均测定 3 次后取平均值。其中，沉积物 pH 采用电位法测定（水:土=5:1），盐度采用电导率法进行测定。

2.3 污染负荷指数法

根据 Tomlinson 等提出的污染负荷指数法（Pollution Load Index）对研究区的重金属污染水平的进行评价。该指数由评价区域所包含的多种重金属成分共同构成，它能直观地反映各个重金属对污染的贡献程度，也可反映出重金属在时间、空间上的变化趋势，应用较为方便（丁喜桂等，2005）。其评价步骤如下：

首先，根据某一点的实测重金属含量进行最高污染系数（F）的计算：

$$F_i = C_i/C_{oi} \qquad (1)$$

式中：F_i 为元素 i 的最高污染系数；C_i 为元素 i 的实测含量；C_{oi} 为元素 i 的评价标准，本文选取 Lars Hakanson（1980）提出的现代工业前正常沉积物中重金属含量的最高背景值（Zn=80.00 g、Pb=25.00 g、Cu=30.00 g、Cd=0.50 g）为评价标准。

某一点的污染负荷指数（I_{PL}）为：

$$I_{PL} = \sqrt[n]{F_1 \times F_2 \times F_3 \cdots F_n} \qquad (2)$$

式中：I_{PL} 为某一点的污染负荷指数；n 为评价元素的个数。

某一区域的污染负荷指数（$I_{PL\,zone}$）为：

$$I_{PL\,zone} = \sqrt[n]{I_{PL\,1} \times I_{PL\,2} \times I_{PL\,3} \cdots I_{PL\,n}} \qquad (3)$$

式中：$I_{PL\,zone}$ 为目标区域污染负荷指数；n 为采样点个数。

污染负荷指数法一般分为 4 个等级（Neyestani et al., 2016），具体见表 1

表 1 污染负荷指数与污染程度之间的关系

Table 1　Relationship between pollution load indexes and pollution degrees

污染负荷指数 $I_{PL\,zone}$	<1	1-2	2-3	≥3
污染等级 Class	0	1	2	3
污染程度 Level	无污染 Non-pollution	中度污染 Middle level pollution	强污染 Strong pollution	极强污染 Pole-strength pollution

2.4 健康风险评估

闽东秋茄林分布在滨海，距离居住区较近，且近年来，为了适应基础教育改革和亲子教育活动的需要，越来越多的家长与学校带着儿童去贴近自然，闽东秋茄林湿地也是大量亲子游和教育活动的选择之一，所以有必要对其进行健康风险评价。秋茄林湿地沉积物中的重金属主要通过皮肤接触对人体产生影响（王进军等，2009），因此，本研究主要从皮肤接触途径探讨沉积物重金属对人体的健康风险。金属元素暴露的健康风险包含致癌风险和非致癌风险两种，重金属元素 Cd 属于致癌污染物，Zn、Pb、Cu 属于非致癌污染物，计算公式如下（王丽丽等，2020）：

重金属非致癌健康风险计算公式：

$$RN = ADD/RfD \tag{4}$$

重金属的致癌风险计算公式：

$$RI = ADD \times SF \tag{5}$$

$$ADD = C \times \frac{EF \times ED}{AT \times BW} \times SA \times SL \times ABS \times 10^{-6} \tag{6}$$

式中，*RN* 表示某种重金属通过皮肤暴露途径的非致癌风险（无量纲值），*RfD* 表示皮肤暴露途径的参考值，单位 $mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$，*C* 表示重金属的实测量，单位 $mg \cdot kg^{-1}$，*ADD* 表示日平均暴露量，单位 $mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$。*RI* 表示某种重金属通过皮肤暴露途径的致癌风险（无量纲值）；*SF* 表示致癌斜率因子，单位$(kg \cdot d) \cdot mg^{-1}$。公式中参数的取值与含义见表 2，4 种重金属元素的 *RfD* 参考剂量与斜率因子见表 3（U.S.EPA, 1996；Ferreira-Baptista L, 2005）。

表 2　重金属健康风险评价模型重要参数取值与含义

Table 2　Values and meanings of important parameters in health risk assessment model of heavy metals

参数 Parameter	单位 Unit	含义 Meaning	成年男性 Adult male	成年女性 Adult female	儿童 Children	参考文献 Reference
AT	d	平均暴露时间 Average exposure time	365×*ED*(非致癌)；365×70（致癌）	365×*ED*(非致癌)；365×70（致癌）	365×*ED*(非致癌)；365×70（致癌）	U. S. EPA, 2002
BW	kg	平均体重 Average body weight	62.7	54.4	15	环境保护部，2013(CAEPI, 2013)
ED	a	暴露年限 Exposure years	30	30	6	环境保护部，2014(CAEPI, 2014)
EF	$D \cdot a^{-1}$	暴露频率 Exposure frequency	350	350	350	环境保护部，2014(CAEPI, 2014)
SL	$mg \cdot cm^{-1}$	皮肤黏着度 Skin adhesion	0.07	0.07	0.20	环境保护部，2014(CAEPI, 2014)
SA	$cm^2 \cdot d^{-1}$	皮肤暴露面积 Skin exposure area	1 701	1 701	899	王喆等，2008(WANG Zet al., 2008)
ABS	/	皮肤吸收因子 Skin absorption factor	0.001	0.001	0.001	U.S.EPA, 2002

表 3　重金属的参考值与致癌斜率因子

Table 3　Reference values and carcinogenic slope factors of heavy metals

类别 Category	金属元素 Metallic element($mg\cdot kg^{-1}$)	RfD($mg\cdot (kg\cdot d)^{-1}$)	SF($(kg\cdot d)\cdot mg^{-1}$)
非致癌 Noncarcinogenic	Zn	6.00×10^{-2}	—
	Pb	5.25×10^{-4}	—
	Cu	1.20×10^{-2}	—
致癌 Carcinogenic	Cd	—	6.10

注：“—”表示无对应参考值。

Note: “—”Indicates that there is no corresponding reference value.

3 结果与分析

3.1 闽东不同起源秋茄林表层沉积物中重金属含量比较

闽东不同起源秋茄林湿地表层沉积物重金属含量统计结果见表 4。天然秋茄林湿地表层沉积物中重金属含量波动范围较大，其中 Zn 的含量范围为 67.98~144.21 $mg\cdot kg^{-1}$，Pb 的含量范围为 50.48~152.95 $mg\cdot kg^{-1}$，Cu 的含量范围为 8.06~21.78 $mg\cdot kg^{-1}$，Cd 的含量范围为 0.24~2.64 $mg\cdot kg^{-1}$；平均含量排序为：Zn> Pb> Cu> Cd；Cd 的变异系数明显大于 Cu、Pb、Zn，排序为：Cd（26.37 %）> Cu（15.78 %）> Zn（2.40 %）> Pb（1.26 %）；除 Cu 外，天然林其他 3 种重金属平均含量均超过背景值，超标率分别为 Zn（71.43%）、Pb（100%）、Cd（79.92%）。人工秋茄林湿地表层沉积物中重金属含量波动范围同样较大，其中 Zn 的含量范围为 114.45~187.62 $mg\cdot kg^{-1}$，Pb 的含量范围为 52.83~123.03 $mg\cdot kg^{-1}$，Cu 的含量范围为 5.82~25.19 $mg\cdot kg^{-1}$，Cd 的含量范围为 0.30~2.53 $mg\cdot kg^{-1}$；人工林表层沉积物重金属含量排序为：Zn> Pb> Cu> Cd；Cd 的变异系数明显大于 Cu、Pb、Zn，排序为：Cd（27.07 %）> Cu（18.74 %）> Zn（5.36 %）> Pb（3.94 %）；除 Cu 外，天然林其他 3 种重金属平均含量均超过背景值，超标率分别为 Zn（100%）、Pb（100%）、Cd（85.71%）。

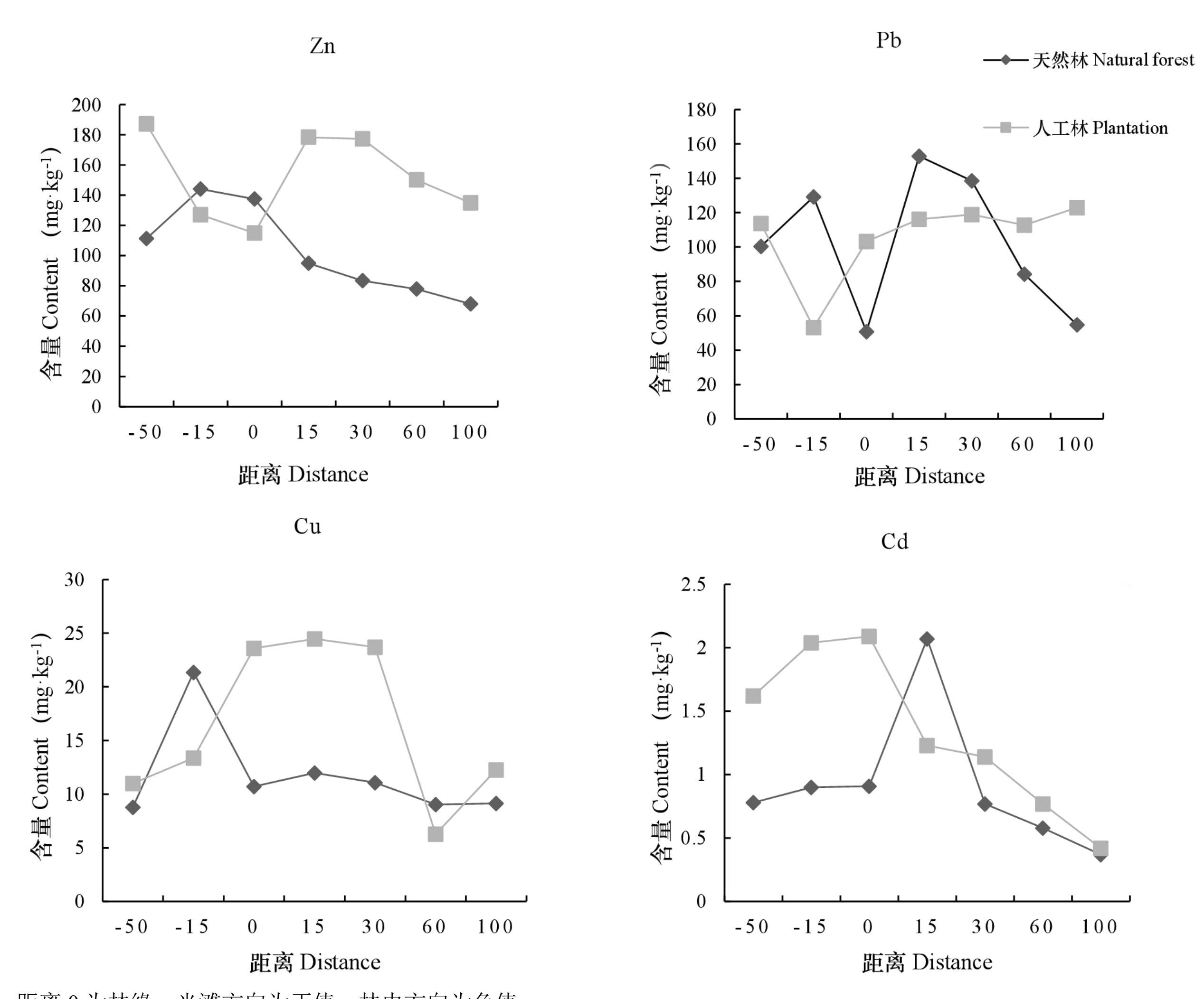
表 4　闽东湿地不同起源秋茄林表层沉积物重金属含量统计结果

Table 4　Statistical results of heavy metal contents in surface sediments of *Kandelia obovata* of different provenances in eastern Fujian wetland

指标 Indicator	天然林 Natural forest				人工林 Plantation			
	Zn	Pb	Cu	Cd	Zn	Pb	Cu	Cd
最小值 Minimum value（$mg\cdot kg^{-1}$）	67.98	50.48	8.06	0.24	114.45	52.83	5.82	0.30
最大值 Maximum value（$mg\cdot kg^{-1}$）	144.21	152.95	21.78	2.64	187.62	123.03	25.19	2.53
平均值 Average（$mg\cdot kg^{-1}$）	102.38	101.53	11.72	0.91	152.81	105.83	16.38	1.33
背景值 Background value（$mg\cdot kg^{-1}$）	80.0	25.0	30.00	0.50	80.0	25.0	30.00	0.50
变异系数 Coefficient of variable（%）	2.40	1.26	15.78	26.37	5.36	3.94	18.74	27.07
超标率 Exceeding standard rate（%）	71.43	100.00	0	79.92	100.00	100.00	0	85.71

3.2 闽东不同起源秋茄林湿地沉积物中重金属的垂岸分布特征

闽东不同起源秋茄林湿地沉积物中重金属含量的垂岸分布如图 1 所示。在秋茄天然林湿地沉积物中，除元素 Zn 外，重金属元素 Pb、Cu、Cd 的含量在林外 100 m 到 15 m 表层沉积物的分布都呈逐渐增加趋势，林外 15 m 至林缘逐渐下降，林缘到林内呈逐渐下降趋势。在秋茄人工林湿地沉积物中，重金属元素 Zn、Pb 含量分布都呈林外到林缘先减少后增加的情况，重金属元素 Cu、Cd 含量分布都为林外到林缘逐渐增加，林缘到林内逐渐下降。



距离 0 为林缘，光滩方向为正值，林内方向为负值

The distance 0 is the edge of the forest, the direction of light beach is positive, and the direction inside the forest is negative.

图 1 闽东不同起源秋茄林湿地沉积物中重金属含量垂岸分布特征

Fig.1 Vertical distribution characteristics of heavy metals in sediments of *Kandelia obovata* wetlands of different origins in eastern Fujian

3.3 闽东不同起源秋茄林沉积物重金属污染特征

闽东滨海秋茄红树林湿地沉积物中 4 种重金属之间的 Pearson 相关性分析结果见表 5。在秋茄天然林湿地沉积物重金属中，Zn、Pb、Cu、Cd 两两之间呈现正相关关系，其中，Zn 与 Cu、Pb 与 Cd、Pb 与 Cu 之间显著相关、Zn 与 Cd 之间极显著相关。在人工秋茄红树林湿地沉积物重金属中，Pb 与 Cu 之间极显著负相关，Zn 与 Pb、Cu 与 Cd 之间呈现显著正相关关系，Zn 与 Cd、Zn 与 Cu 以及 Pb 与 Cd 之间呈现极显著正相关关系。

表 5 沉积物中重金属之间的 Pearson 相关性

Table 5 Pearson correlation between heavy metals in sediments

指标 Indicator	天然林 Natural forest				人工林 Plantation			
	Zn	Pb	Cu	Cd	Zn	Pb	Cu	Cd
Zn	1.000				1.000			
Pb	0.143	1.000			0.485*	1.000		
Cu	0.446*	0.469*	1.000		0.184**	-0.227**	1.000	
Cd	0.197**	0.644*	0.424	1.000	0.248**	0.664**	0.324*	1.000

*表示 P<0.05，显著相关；**表示 P<0.01，极显著相关。

* indicates sampling points of P<0.05, significant correlation; ** indicates sampling points of P<0.01, extremely significant correlation.

闽东滨海秋茄红树林湿地采样点重金属污染特征如图 2 所示，天然林中采样点 FW1、FW2、FE、FB1、FB2、FB3 的 I_{PL} 值在 1~2 之间，污染等级为 1，属于中度污染；FB4 的 I_{PL} 值小于 1，污染等级为 0，属于无污染。人工林中采样点 FW1、FW2、FB3、FB4 的 IPL 值在 1~2 之间，污染等级为 1，属于中度污染；FE、FB1、FB2 的 IPL 值在 2~3 之间，污染等级为 2，属于强污染，结果表明，人工林的污染程度比天然林高，从而进一步说明不同起源红树林湿地周围的污染物排放情况和地质条件本底值水流状况具有较大差异。

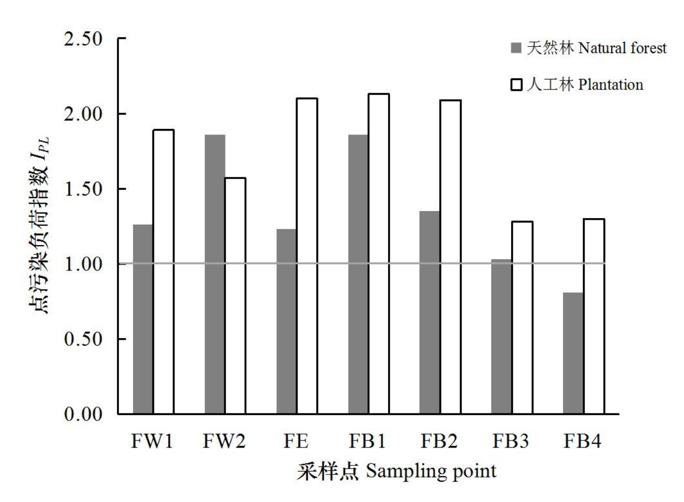


图 2　采样点重金属污染负荷指数（I_{PL}）值

Fig.2 Heavy metal pollution load index (I_{PL}) values of sampling sites

污染负荷指数法计算结果显示（表 6）：闽东湿地天然秋茄红树林表层沉积物重金属的区域污染负荷指数（$I_{PL\ zone}$）比人工红树林的低，但对应的污染等级都为 1，均属于中度污染。

表 6　不同起源秋茄林沉积物重金属污染负荷指数

Table 6　Heavy metal pollution load index of *Kandelia obovata* sediments from different origins

类型 Types	污染负荷指数（$I_{PL\ zone}$）Pollution load index	污染等级 Class of pollution	污染程度 Pollution level
天然林 Natural forest	1.29	1	中度污染 Middle level pollution
人工林 Plantation	1.73	1	中度污染 Middle level pollution

3.4　闽东不同起源秋茄林沉积物重金属健康风险评价

对闽东秋茄红树林湿地沉积物重金属进行健康风险评价，结果如表 7。通过皮肤接触途径来看，天然林和人工林沉积物中的 Zn、Pb、Cu 的非致癌风险表现为：$RN_{儿童}$>$RN_{成年女性}$>$RN_{成年男性}$，这与儿童的吮吸行为、女性的体重等因素有关，其中天然林和人工林儿童的 Pb 的 RN 高于 1，这表明通过皮肤接触途径湿地重金属 Pb 对儿童存在非致癌风险。通过皮肤接触途径 Cd 的致癌风险表现为：$RI_{儿童}$>$RI_{成年女性}$>$RI_{成年男性}$，且都高于 1.0×10^{-6}，这表明 Cd 通过皮肤接触途径对人体存在严重的致癌风险。

表 7　不同起源秋茄林沉积物重金属健康风险评价结果

Table 7　Health risk assessment of heavy metals in *Kandelia obovata* sediments from different origins

金属元素 Metallic element			天然林 Natural forest			人工林 Plantation		
			成年男性 Adult male	成年女性 Adult female	儿童 Children	成年男性 adult male	成年女性 Adult female	儿童 Children
皮肤接触途径 Route of	RN	Zn	3.11×10^{-3}	3.58×10^{-3}	1.96×10^{-2}	4.64×10^{-3}	5.35×10^{-3}	2.93×10^{-3}
		Pb	3.52×10^{-1}	4.06×10^{-1}	2.22	3.67×10^{-1}	4.23×10^{-1}	2.32

skin contact		Cu	1.78×10^{-3}	2.05×10^{-3}	1.12×10^{-2}	2.49×10^{-3}	2.86×10^{-3}	1.57×10^{-2}
	RI	Cd	4.33×10^{-6}	4.99×10^{-6}	5.47×10^{-6}	6.33×10^{-6}	7.29×10^{-6}	7.99×10^{-6}

当 *RN* ＞1 时，非致癌风险存在；*RN* ≤ 1 时，风险小或可忽略不计；当 *RI* ＞ 1.0×10^{-6} 时，存在严重致癌风险；*RI* ≤1.0×10^{-6} 时，风险较小或可忽略。
When *RN* > 1, the noncarcinogenic risk is small or negligible; When *RN* ≤ 1, the risk is small or negligible; When *RI* > 1.0×10^{-6}, there is a serious risk of cancer; When *RI* ≤ 1.0×10^{-6}, the risk is small or negligible.

4 讨论与结论

4.1 不同起源秋茄林湿地重金属污染特征

闽东不同起源秋茄红树林湿地沉积物重金属的平均含量表现为：人工林＞天然林，这种差异与不同起源湿地周边的排污严重情况不一致以及不同起源秋茄林吸附时间不同有关，这与何东进等（2012）的研究结果一致。丘耀文和余克服（2011）的研究发现，变异系数可以反应各样本数据空间上的离散程度，变异系数较小的元素自然来源占主导地位，较大的变异系数的元素人为影响占据主导地位。本研究中，天然林湿地重金属 Zn、Pb 的变异系数较小，重金属 Cu、Cd 的变异系数较大，表明天然林湿地 Zn、Pb 自然来源为主导，而 Cu、Cd 来源受人为干扰影响更强烈，人工林与天然林相一致。天然林与人工林湿地重金属含量在林内深处都有明显下降，其原因一方面可能是细颗粒物质是吸附与富集重金属的主要载体，在水动力作用稍弱的中高潮滩区域，伴随着细颗粒泥沙的淤积（陈彬，2014）；另一方面可能是秋茄林内一些植物吸收部分重金属或这些植物影响了湿地土壤结构，从而产生了更多的细颗粒物质吸附与富集重金属（蓝福生等，1994），因此，秋茄林的保护具有重要意义。

相关性分析可间接推测湿地沉积物重金的来源和途径，元素之间相关性显著或极显著，表明在该地区元素间具有同源性或者呈复合污染（Guo *et al*., 2012），本研究发现，天然林中的 Zn 与 Cu、Pb 与 Cd、Pb 与 Cu、Zn 与 Cd 之间具有同源性或呈复合污染，人工林中的 Zn 与 Pb、Cu 与 Cd、Zn 与 Cd、Zn 与 Cu 以及 Pb 与 Cd 之间具有同源性或呈复合污染，而人工林中的 Pb 与 Cu 负相关，这是因为 Pb 的迁移性较差，主要累积于沉积物表层。从采样点的污染负荷指数来看，天然林采样点林外 100 m 无污染，人工林采样点林缘、林外 15 m、林外 30 m 存在强污染，存在较大的生态安全隐患需优先防治，其他采样点均存在中度污染。从区域污染负荷指数来看，人工林污染比天然林严重，但均为中度污染。其原因一方面可能是不同起源秋茄林湿地土壤结构的差异性（张晓雅，2020），以及对土壤中重金属的富集能力不同导致其本身的累积量具有差异（何东进等，2012）；另一方面可能是不同起源秋茄林所受人为干扰程度不同，由于人工林靠近居民区且周边排污口和人工虾塘较多，导致其比天然林污染更严重，而人工林中的强污染样点则是最靠近人工虾塘的样点。

4.2 不同起源秋茄林湿地重金属健康风险

从不同人群对健康风险的敏感度来看，儿童对湿地沉积物中重金属的非致癌风险和致癌风险最敏感，成年男性敏感度则最低，这与王丽丽等（2021）的研究结果一致，这可能和儿童年龄小、身体免疫力与耐受能力低有关。因此，应避免儿童接触研究区域的滩涂。本研究发现，人工林与天然林重金属 Pb 的检测浓度 100％超标，在进行健康风险评估后，其对儿童的非致癌风险超过了 U.S.EPA 等国际机构的最大可接受风险值(*RN*＞1)，且重金属 Pb 在成年男性与女性中的 *RN* 均高于其他重金属元素。重金属 Cd 的检测浓度也严重超标(天然林 79.92％和人工林 85.71％)，其对儿童与成人的致癌风险超过了 U.S.EPA 等国际机构的最大可接受风险值(*RI*＞1.0×10^{-6})。因此，重金属 Pb 与 Cd 成为闽东秋茄林湿地的主要健康风险来源元素。本研究与何东进等（2012、2013）对闽东湿地重金属的研究相比，前者更多是研究闽东秋茄林湿地重金属的积累特征与空间分布，本研究则评估了湿地重金属对人体的健康风险。由于儿童与成人、男性与女性的身体素质、心理和习惯等存在差异，在进行健康风险评价时，最好分人群计算以便更加切合实际。

综合来看，闽东秋茄林湿地沉积物重金属污染较为严重，对公众存在健康隐患，应积极采取防治措施。因此，提出科学管理对策如下：（1）对红树林的保育可采取自然恢复为主、人工恢复为辅

的策略，由于研究结果显示人工林污染比天然林严重，故而不能盲目人工造林。(2) 完善监测机制。将重金属的健康风险评价加入秋茄林湿地生态系统评价工作中，尤其需要注重致癌重金属元素（如Cd）的监测，将健康风险评价与其它沉积物评价相结合，能更全面、及时掌握秋茄林生境的安全状况，有助于加强秋茄林的生态保护与风险管理。

参考文献:

AGORAMOORTHY G, CHEN FA, HSU MJ, 2008. Threat of heavy metal pollution in halophytic and mangrove plants of Tamil Nadu, India[J]. Environ Poll, 155(2): 320-326.

CAEPI, 2013. Handbook of exposure parameters for Chinese population. [M]. Beijing: China Environment press: 837-1004. [环境保护部，2013. 中国人群暴露参数手册. [M]. 北京：中国环境出版社：837-1004.]

CAEPI, 2014. HJ 25.3—2014 Technical guidelines for risk assessment of contaminated sites [S]. Beijing: China Standards Press: 52-53. [环境保护部，2014. HJ 25.3—2014 污染场地风险评估技术导则[S]. 北京：中国环境出版社：52-53.]

CHEN B, 2014. Source sink effects of heavy metals in fine-grained sediments and their responses to human activities in eastern China[D]. Ocean University of China. [陈彬，2014. 中国东部海域细颗粒沉积物中重金属源汇效应和其对人类活动响应[D]. 青岛：中国海洋大学：75-85.]

DEFEW LH, MAIR JM, GUZMAN HM, 2005. An assessment of metal contamination in mangrove sediments and leaves from Punta Mala Bay, Pacific Panama[J]. Mar Poll Bull, 50(5): 547-552.

DING XG, YE SY, GAO ZJ, 2005. Evaluation method of heavy metal pollution in offshore sediments [J]. Mar Geol Dyn, 12 (8): 31-36. [丁喜桂，叶思源，高宗军，2005. 近海沉积物重金属污染评价方法[J]. 海洋地质动态，12(8): 31-36.]

FERNANDEZ-CADENA JC, RUIZ-FERNANDEZ PS, FERNANDEZ-RONQUILLO TE, et al., 2019. Detection of sentinel bacteria in mangrove sediments contaminated with heavy metals[J]. Mar Pollut Bull, 150(3): 110701.1-110701.10.

GAO Y, GUO X, LI C, et al., 2015. Characteristics of PM2.5 in Miyun, the northeastern suburb of Beijing: chemical composition and evaluation of health risk [J]. Environ SCI Pollut R, 22(21): 16688-16699.

GOU G, WU F, XIE F, et al., 2012. Spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in urban soils from southwest China[J]. J Environ SCI-China, 24(3): 410-418.

HE DJ, ZHENG KJ, WANG R, et al., 2012. Comparison of accumulation and distribution characteristics of heavy metal elements Zn, CD, Cu in *Kandelia candel* forest from different origins in coastal wetlands of eastern Fujian[J]. J Fujian Agr Forest Uni (Nat Sci), 41(2): 187-192. [何东进，郑开基，王韧，等, 2012. 闽东滨海湿地不同起源秋茄林重金属元素 Zn、Cd、Cu 的累积与分布特征比较[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 41(2): 187-192.]

HE DJ, YOU WB, WANG R, et al., 2013. Comparison of spatial distribution characteristics of heavy metals in sediments of *Kandelia* wetland of different origins in the northern edge of mangrove natural distribution in China[J] Chin J Appl Environ Biol, 19(6): 945-951. [何东进, 游巍斌, 王韧, 等, 2013. 中国红树林天然分布北缘区不同起源秋茄林湿地沉积物重金属空间分布特征比较[J]. 应用与环境生物学报, 19(6): 945-951.]

HAKANSON L, 1980. An ecological risk index for aquatic pollution control a sedimentological approach[J]. Water Res, 14(8): 975-1001.

FERREIRA-BAPTISTA L, MIGUEL ED, 2005. Geochemistry and risk assessment of street dust in Luanda, Angola: A tropical urban environment [J]. Atmos Environ, 39(25):4501-4512.

LE FS, LI RT, Chen P, et al., 1994. The relationship between mangrove and soil on the beach of Guangxi. [J]. Guihaia, 14(1): 54-59. [蓝福生，李瑞棠，陈平，等，1994. 广西海滩红树林与土壤的关系[J]. 广

西植物，14(1)：54-59.]

LIU JL, LI HL, TANG YJ, et al., 2017. Heavy metal pollution status of economic fish in Zhuhai Qi'ao mangrove wetland and its risk to human health[J]. Ecol Sci, 36(5): 186-195. [刘金苓，李华丽，唐以杰，等，2017. 珠海淇澳岛红树林湿地经济鱼类的重金属污染现状及对人体健康风险分析[J].生态科学, 36(5): 186-195.]

MORSHDY A, DARWISH WS, DAOUD J, et al., 2019. Estimation of metal residues in Oreochromis niloticus and Mugil cephalus intended for human consumption in Egypt: a health risk assessment study with some reduction trials ［J］. J Verbrauch Lebensm, 14(1) : 81-91.

NEYESTANI MR, BASTAMI KD, M ESMAEILZADEH, et al., 2016. Geochemical speciation and ecological risk assessment of selected metals in the surface sediments of the northern Persian Gulf[J]. Mar Poll Bull, 109(1): 603-611.

PEIFEI C, XIAOHUI B, JIAQOA Z, et al., 2015. Assessment of heavy metal pollution characteristics and human health risk of exposure to ambient PM2.5 in Tianjin, China [J]. Particuology, 20(3): 104-109.

QIN Y, HUAGUA C, BAIZHAN L, 2015. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Indoor Dusts of Guizhou, Southwest of China: Status, Sources and Potential Human Health Risk. [J]. PLoS ONE, 10(2):1-17.

QIU YW, YU KF, 2011. Accumulation of heavy metals in sediments of mangrove wetlands in Hainan [J]. Acta Trop Ocean, 30(02): 102-108. [丘耀文，余克服，2011. 海南红树林湿地沉积物中重金属的累积[J]. 热带海洋学报，30(02)：102-108.]

SHI C, YU L, CHAI M, et al., 2020. The distribution and risk of mercury in Shenzhen mangroves, representative urban mangroves affected by human activities in China[J]. Mar Poll Bull, 151(Feb.):110866.1-110866.9.

SHI C, DING H, ZAN Q, et al. 2019. Spatial variation and ecological risk assessment of heavy metals in mangrove sediments across China[J]. Mar Poll Bull, 143(JUN.): 15-124.

TAO YH, HUANG X, WANG XP, et al., 2020. Soil carbon and nitrogen storages in three mangrove stands of Zhenzhu Gulf，Guangxi[J]. Guihaia, 40(3): 285-292. [陶玉华， 黄星， 王薛平， 等, 2020. 广西珍珠湾三种红树林林分土壤碳氮储量的研究[J]. 广西植物，40(03)：285-292.]

REZAEI M, KAFAEI R, MAHMOODI M, et al. 2021. Heavy metals concentration in mangrove tissues and associated sediments and seawater from the north coast of Persian Gulf, Iran: Ecological and health risk assessment[J]. Environ Nanotechnol Monit Manage, 15(9): 100456.1-100456.14.

U.S.EPA, 2002. Supplemental Guidance for developing doil dcreening levels for super fund sites[M]. Washington, DC: Office of SOILD Waster and Emergency Response: 1-106.

U.S.EPA, 1996. Soil Screening Guidance: Technical Background Document [M]. Washington, DC: Office of Solid Waste and Emergency Response: 1-447.

WANG JJ, LIU ZQ, GU XN, et al., 2009. Health risk assessment method of environmental carcinogens [J]. Foreign Med (Hyg), 36 (1): 50-58. [王进军，刘占旗，古晓娜，等，2009. 环境致癌物的健康风险评价方法[J]. 国外医学(卫生学分册)，36(1)：50-58.]

WANG LL, JIN HN, WU ZH, et al.,2021. Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in different types of construction dust [J]. China Environ Sci, 41(3): 1055-1065. [王丽丽，金团囡，武志宏，2021. 不同类型施工降尘中重金属污染特征及健康风险评价[J]. 中国环境科学，41(3)：1055-1065.]

WANG Z, LIU SQ, CHEN XM, et al., 2008. Estimation of Chinese skin exposure area in health risk assessment [J]. J Saf Environ, 15 (4): 152-156. [王喆，刘少卿，陈晓民，等，2008. 健康风险评价中中国人皮肤暴露面积的估算[J]. 安全与环境学报，15(4)：152-156.]

YANG D, LIU CJ, WANG Q, et al., 2019. Geochemical and probabilistic human health risk of chromium in mangrove sediments: A case study in Fujian, China[J]. Chemosphere, 233(OCT.):503-511.

ZHANG XY, 2020. Study on the relationship between vegetation characteristics and soil properties in different types of wetland protected areas in the middle reaches of Heihe River[D]. Lanzhou: Northwest Normal University. [张晓雅，2020. 黑河中游湿地不同类型保护地植被特征与土壤性质关系研究[D]. 兰州：西北师范大学：31-38.]

ZHANG QY, QIN YJ, LIU XH, et al., 2020. Distribution and ecological risk assessment of toxic metals in mangrove sediments in Guangdong[J]. Ecol Environ Sci, 29(1): 183-191. [张起源，秦颖君，刘香华，等，2020.广东红树林沉积物有毒金属分布及生态风险评价[J].生态环境学报, 29(1): 183-191.]